

ASPECTOS NECESARIOS A INTRODUCIR EN LA MODELIZACIÓN NUMÉRICA 3D DE LAS PRESAS DE ESCOLLERA CON PANTALLA DE HORMIGÓN PARA REPRODUCIR CORRECTAMENTE LAS TENSIONES EN EL ELEMENTO DE IMPERMEABILIZACIÓN

**Moreno Robles, Javier
Senís Álvarez, Montse
Olalla Marañón, Claudio**

RESUMEN: El diseño de las presas de escollera con pantalla de hormigón, como elemento de impermeabilización se aborda habitualmente realizándose diversos cálculos bidimensionales en deformación plana del cuerpo de presa en varias secciones. Sin embargo, esta metodología de cálculo no permite determinar, con la suficiente precisión, el estado tensional de la pantalla de hormigón, por lo que su seguridad estructural tampoco se puede estimar adecuadamente.

En el presente artículo se plantean las particularidades más importantes que se deben introducir en una modelización numérica, para poder determinar adecuadamente las flexiones transversales y longitudinales de la losa de hormigón que permitirán valorar si el diseño es adecuado tanto en situación de rotura como de servicio. Estos aspectos a modelizar son, entre otros: reproducción de la topografía del vaso, reproducción de las fases constructivas y de llenado, zonificación del cuerpo de la presa, optimización de la discretización de la losa de impermeabilización (relación de aspecto y número mínimo de elementos en el canto), empleo de elementos junta entre paneles verticales de la losa y entre la

losa y el apoyo en el plinto y, finalmente, monitoreo de elementos de auscultación durante la construcción y llenado de la presa.

Se presentan los resultados que se obtienen en un ejemplo concreto y típico, con un modelo que incorpora estas características permitiendo optimizar las armaduras de la losa de impermeabilización, introducir los refuerzos si éstos fuesen necesarios y mejorar la confianza en el diseño estructural del elemento al que se le confía la impermeabilización de la presa. Se mostrará que, aunque el volumen de información que se genera es muy elevado, su presentación se puede hacer de manera amable, visual y pedagógica.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, las presas que fueron las primeras en construirse son las presas que empleaban materiales térreos de las inmediaciones, a las que se las debía dotar de un elemento impermeabilizador (Vallarino, E. 1995).

La tipología de este elemento ha evolucionado de forma asociada a las características geotécnicas del material en el que se apoya. Así, las pantallas de hormigón que se empleaban en los años 20 se fueron desechando a medida que aumentaba la altura de las presas dando paso a núcleos impermeables de tierra.

Fue en los años 60, con la aparición de las técnicas de compactación de materiales granulares gruesos mediante rodillos vibradores, cuando se volvió a emplear pantallas de hormigón apoyadas, en la cara de aguas arriba de las presas, sobre escolleras, denominándose esta tipología como presas de escollera con pantalla de hormigón (Concrete Face Rockfill Dam, o mediante su acrónimo CFRD).

El diseño estructural de la pantalla de hormigón (espesor y armado) se ha venido haciendo básicamente mediante el empleo de formulaciones empíricas basadas en experiencias anteriores. En el presente artículo se muestra cómo, mediante la incorporación de las hipótesis correctas y las técnicas de cálculo adecuadas, se puede validar, precisar y optimizar dicho diseño.

2. METODOLOGÍA CLÁSICA DE DISEÑO

La metodología empleada en el diseño clásico de esta tipología de presas consistía en considerar unos taludes con una inclinación exterior del orden de 1.5H: 1V contruidos con escollera zonificada. La escollera de mejor calidad se dispone en las zonas de aguas arriba. La pantalla de hormigón descansa sobre unos materiales granulares tipo arena o similar.

El espesor (e) de la pantalla se calculaba habitualmente mediante una formulación empírica del tipo $e \text{ (m)} = 0,3 + \varepsilon H$ siendo ε un coeficiente que varía entre 0,003 y 0,002, y H la altura de la presa (m). La armadura consiste en una malla rectangular de 0,4% de cuantía geométrica en cada dirección, pudiéndose modificar este valor en función de la calidad del apoyo de la losa.

Este diseño se suele complementar con una serie de cálculos bidimensionales de diferentes secciones transversales de la presa, aplicando la condición de deformación plana, donde el único estado tensional de la losa que se obtiene es el correspondiente a la dirección contenida en el plano de estudio.

Dicho estado tensional, además de estar limitado a una única dirección, está fuertemente condicionado por la imposición de las hipótesis de deformación plana, que no reproduce adecuadamente la realidad. Para poder superar dichas limitaciones y carencias en la obtención de las tensiones de la losa, y así posibilitar la verificación de la bondad del diseño, se plantean a continuación las características que debería incluir un modelo de cálculo.

3. MODELIZACIÓN 3D. ASPECTOS A INCLUIR

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, el empleo de un modelo tridimensional, frente a uno en dos dimensiones en sentido transversal, supone un incremento muy notable del esfuerzo computacional (tiempo de cálculo, requerimientos de memoria, número de microprocesadores, etc.), pero permite, por el contrario, no emplear simplificaciones respecto del estado tensional (deformación plana) y reproducir más fielmente la geometría de la presa, con las particularidades que pueda presentar.

En los siguientes apartados se indica, de forma sucinta, los aspectos que se consideran que son necesarios incluir en un modelo tridimensional para que se reproduzca adecuadamente la realidad del problema a modelizar.

A modo de ejemplo ilustrativo, en cada uno de los aspectos se van a incluir figuras de un cálculo realizado, con un diseño de presa CFRD típico atendiendo a los criterios más recientes de ICOLD, (2011), con el programa de diferencias finitas tridimensional denominado Flac3D (Minneapolis, USA) en su versión 4.00.

Es importante indicar, por otro lado, que el volumen de información que se genera en un cálculo numérico tridimensional puede alcanzar varias decenas de Gigabytes, motivo por el cual su gestión y, sobretudo, su presentación debe ser de la manera más sencilla y amable posible. Un exceso de información puede ser contraproducente, en la medida en la que no se pueda distinguir con claridad entre los resultados de los cálculos que son accesorios, de los resultados que son verdaderamente importantes.

3.2. GEOMETRÍA Y TOPOGRAFÍA

La forma de la cerrada donde se va a situar la presa tiene una muy notable influencia en los esfuerzos y deformaciones que va a soportar el cuerpo de la misma y, por ende, la pantalla de hormigón. Así por ejemplo, una cerrada con las laderas muy abruptas formando un valle en forma de “V”, en donde la relación entre la longitud de la coronación y la altura de la presa es muy reducida, se comporta de manera muy diferente a una cerrada con laderas muy separadas y con una amplia zona horizontal en la zona central del apoyo, es decir un valle en forma de “U”.

Además es importante reproducir adecuadamente la superficie del terreno que va a quedar tras la excavación prevista, ya que se pueden producir, artificialmente, por la excavación, zonas singulares o más deprimidas que puedan causar asientos diferenciales en el cuerpo de la presa.

Mediante las adecuadas herramientas informáticas de diseño se pueden introducir directamente los planos 3D del Proyecto en un programa de generación de superficies, realizando un mallado a partir de la superficie realmente obtenida por los proyectistas de la presa.

En la Figura 1 se muestra un ejemplo que ilustra gráficamente de la bondad y de la calidad de la representación, entre el modelo topográfico del terreno y su transposición a elementos geométricos propios del mallado en elementos finitos.

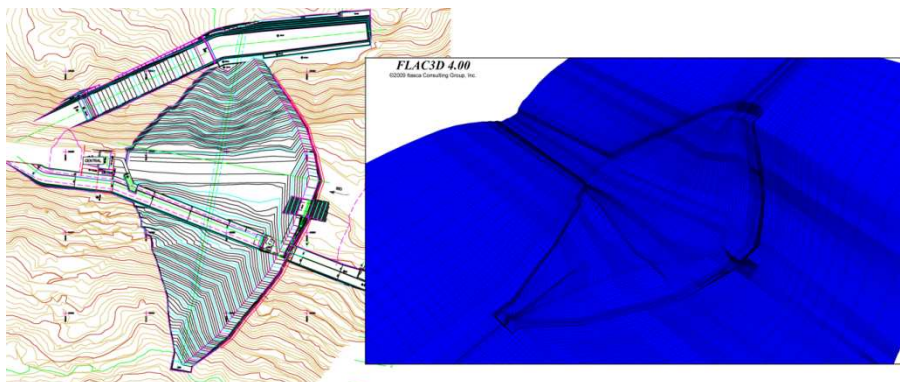


Figura 1. Ejemplo de generación de mallado a partir de la topografía real

3.3. FASES CONSTRUCTIVAS Y DE LLENADO

Obviamente, una de las acciones a las que se ve sometido el cuerpo de la presa es su propio peso. El modelo constitutivo de comportamiento de los materiales térreos (tal y como se indicará posteriormente) no debe ser elástico lineal sino elástico, o elasto-plástico, no lineal, por lo que las deformaciones que sufre y su rigidez estará afectada por el estado tensional, o lo que es lo mismo, por la altura de recrecimiento de la presa en cada fase de construcción.

Para ilustrar la influencia entre la altura del espesor de recrecimiento (“tongada de cálculo” mediante la que se reproduce la construcción) se muestra el análisis paramétrico realizado por Itasca Consultores (Itasca Consultores, 2011) donde se estudia el perfil de asentamientos verticales obtenido para una presa de materiales sueltos con comportamiento tenso deformacional de tipo hiperbólico, en función de la altura de la “tongada de cálculo” empleada.

En la Figura 2 se puede apreciar cómo, a medida de que la “tongada de cálculo” tiene un mayor espesor, los asentamientos registrados alcanzan una mayor magnitud, tanto en su valor máximo, a media altura, como fundamentalmente en la coronación de la presa.

Incorporando a este análisis la variable del tiempo de cálculo necesario, que se incrementa notablemente cuando las “tongadas de cálculo” se consideran muy pequeñas, se puede comprobar que el valor óptimo de tongada a introducir en el cálculo es del orden de 2 m, obteniéndose prácticamente los mismos resultados que el en caso de “tongadas cálculo” de menor espesor, pero con un esfuerzo computacional razonablemente asumible.

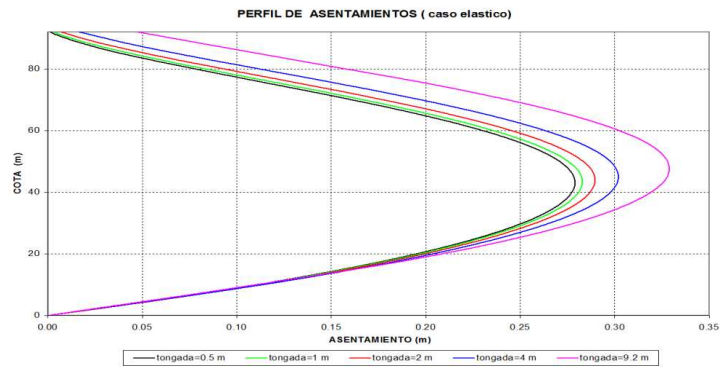


Figura 2. Ejemplo de la influencia del mallado en los resultados obtenidos. Itasca Consultores, 2011.

Un aspecto importante a tener presente es que el mallado del cuerpo de la presa está fuertemente condicionado por la construcción de la misma en tongadas horizontales y de un espesor determinado, por lo que la generación de los elementos debe ser tal que éstos tengan caras horizontales paralelas, superior e inferior, a las cotas de crecimiento de la presa.

En la Figura 3 se pueden ver diferentes fases de cálculo empleadas para la simulación de la construcción del cuerpo de la presa del ejemplo típico utilizado, mostrándose en diferentes colores los diversos materiales que están involucrados, y comprobándose que la coronación es horizontal en todas las fases.

En relación a la modelización de la carga de agua, ésta tiene una doble componente. Por un lado está la aplicación mecánica de la presión de agua en la losa de hormigón, en el plinto y en la superficie del terreno aguas arriba. Por otro lado, se debe calcular la red de filtración en el terreno, si es que se considera necesario su valoración porque pueda influir significativamente en los resultados, imponiendo las correspondientes condiciones hidráulicas (de contorno, anisotropía, transmisividad hidráulica, etc.). En ambos casos, para reproducir adecuadamente el llenado se debe subdividir de nuevo la elevación de la cota de agua en diferentes fases de cálculo.

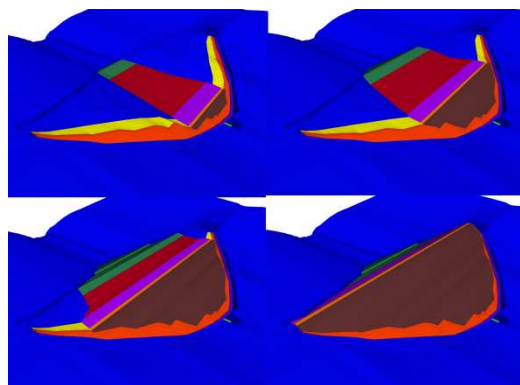


Figura 3. Diversas fases de crecimiento de la presa

3.4. MODELO DE COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES Y ZONIFICACIÓN DE LA PRESA

Para representar la respuesta en tensiones y deformaciones de los diferentes materiales que constituyen el cuerpo de la presa, se suele considerar que, a los efectos deseados, el modelo hiperbólico (Duncan y Chang, 1980) es el que mejor puede reproducir su comportamiento dentro de las posibilidades existentes. En la actualidad, tras muchos años de aplicación y de contraste con comportamientos reales, existe un “cuerpo de doctrina” y una amplia experiencia respecto de los valores a asignar a cada uno de los parámetros implicados, dependiendo de las características geotécnicas básicas de cada material.

Obviamente existen otros modelos y otros criterios más rigurosos que pudieran representar mejor la respuesta esperable, pero adolecen de las siguientes limitaciones:

- Por un lado, su uso está menos generalizado, motivo por el cual el orden de magnitud de los valores de los parámetros que rigen la respuesta es menos conocido, y su influencia en los resultados, están menos contrastados. Tal podría ser el caso, por ejemplo y en particular, del uso de un modelo elastoplástico con rigidización en la rotura, que ha sido aplicado en alguna ocasión para el pronóstico de deformaciones en presas de pantalla de hormigón.
- Por otro lado, su implementación en códigos informáticos resulta más complicada y a su vez, la información que proporcionan suele ser mucho menos amable y versátil, que en los programas de ordenador más utilizados por las empresas de ingeniería.
- Finalmente, estos modelos necesitarían de amplias y sofisticadas campañas de ensayo en laboratorio para poder suministrar de manera ajustada los parámetros necesarios, por la escasez de suficientes documentos referenciados que sirvan de antecedentes reales.

Una vez elegido el tipo de modelo a emplear, a partir de los planos de Proyecto, y mediante el empleo de rangos geométricos⁴ y/o de denominación de volúmenes⁵, se debe ir asignando las distintas propiedades de los materiales, necesarias para alimentar los modelos de comportamiento. Lógicamente, el mallado del volumen del cuerpo de la presa debería estar realizado conforme a la zonificación de materiales, lo que introduce una complicación adicional en la ya de por sí compleja generación tridimensional de la malla. En caso contrario, empleando exclusivamente rangos geométricos se pueden ir asignando los diferentes tipos de materiales a medida que se va simulando la construcción de la presa, quedando, en tal caso, una distribución de zonas menos precisa y más “pixelada”.

⁴ Los programas avanzados de cálculo numérico permiten la referencia a objetos para la asignación de propiedades, aplicación de cargas o condiciones de contorno etc. mediante la definición geométrica del rango de aplicación. A modo de ejemplo pueden ser estos rangos valores límite de coordenadas x, y o z, distancias a un plano definido, volumen encerrado por un cilindro o esfera determinado, etc. A esta metodología de selección se le denomina “rango geométrico”.

⁵ Cuando se van generando las primitivas geometrías sobre las que posteriormente se realizará el mallado, habitualmente se les va asignando una referencia para la posterior aplicación de características, propiedades, cargas o condiciones de contorno.

En la Figura 4 se puede ver en el ejemplo ilustrativo cómo se puede ajustar una zonificación típica del cuerpo de presa con un modelo de cálculo tridimensional, (aunque la vista incluida sea una sección plana, transversal, de la presa), observándose el muy buen ajuste entre la realidad del proyecto y el modelo de cálculo.

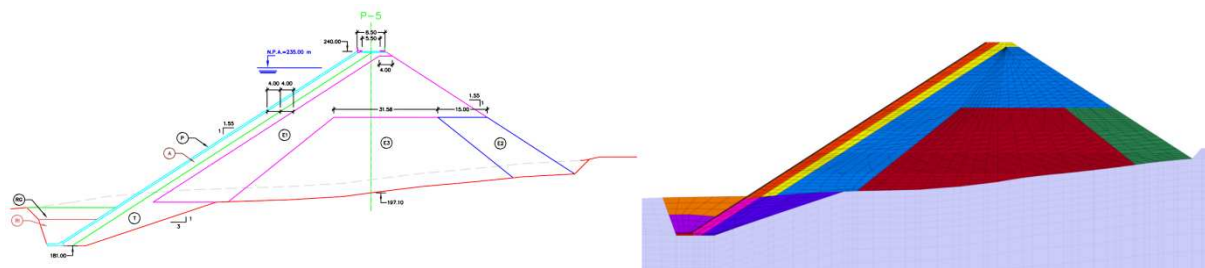


Figura 4.- Zonificación del cuerpo de la presa en planos y aplicación al modelo

3.5. DISCRETIZACIÓN DE LA LOSA DE HORMIGÓN

Este aspecto, habitualmente no tenido en cuenta con suficiente detalle, es de vital importancia para una obtención razonable, y suficientemente precisa, de los esfuerzos en el elemento estructural, a partir de los que se comprobará y/u optimizará el armado del mismo.

Es bien conocido que en un cálculo estructural con un procedimiento numérico cualquiera, los resultados (tensiones, esfuerzos y deformaciones) están íntimamente relacionados con el tipo de elemento y mallado empleado en su resolución. Una expresión habitualmente empleada por los técnicos responsables de la modelización es que son resultados “malla-dependientes”.

La primera decisión que hay que tomar es si se emplea una discretización mediante elementos estructurales o mediante elementos volumétricos.

En el primer caso, (elementos denominados tipo “Shell” en terminología anglosajona), los resultados que suministrará el modelo serán movimientos y esfuerzos, a partir de los que se pueden obtener consecuentemente las distribuciones de tensiones. El espesor de la losa en esta metodología se introduce como una “constante real” del elemento, observándose en el mallado unos elementos con espesor diferencial. Entre la superficie exterior del cuerpo de la presa y la pantalla se debe disponer un elemento interface que permita despegues y un movimiento tangencial diferencial entre la pantalla y los materiales del apoyo.

En el caso de decidirse por una discretización mediante elementos volumétricos, el espesor de la pantalla se introducirá geoméricamente en el modelo, generándose un volumen de espesor igual al de la pantalla al que se le aplicará propiedades de hormigón (elásticas habitualmente, aunque se puede emplear un modelo elastoplástico más avanzado, asimilándolo en la rotura a un comportamiento por ejemplo del tipo Hoek-Brown).

El número de elementos a disponer en el canto de la losa, así como su relación de aspecto (“aspect ratio” en la Figura 5a), influyen notablemente en los resultados obtenidos (Pound, C. 2006). Se entiende por relación de aspecto al cociente entre la dimensión mayor y menor del elemento. Así por ejemplo, en

el caso de emplear un procedimiento de cálculo basado en las diferencias finitas, el número mínimo de elementos a disponer en el canto de la losa para obtener unos resultados suficientemente precisos sería de 4 (en el caso de relación de aspecto 1). Por otra parte, si se emplearan 6 elementos en el canto se requeriría una relación de aspecto del orden de 1 a 2 (Figura 5b) para obtener unos resultados razonables.

Lógicamente, con un mayor número de elementos en el canto, y con una relación de aspecto de 1, los resultados obtenidos serán más precisos. Sin embargo, si se utiliza el método de las diferencias finitas, una malla de cálculo tan fina introduciría un esfuerzo computacional muy importante, no sólo por el incremento en el número de elementos, sino por la disminución en el incremento de tiempo considerado en los cálculos explícitos.

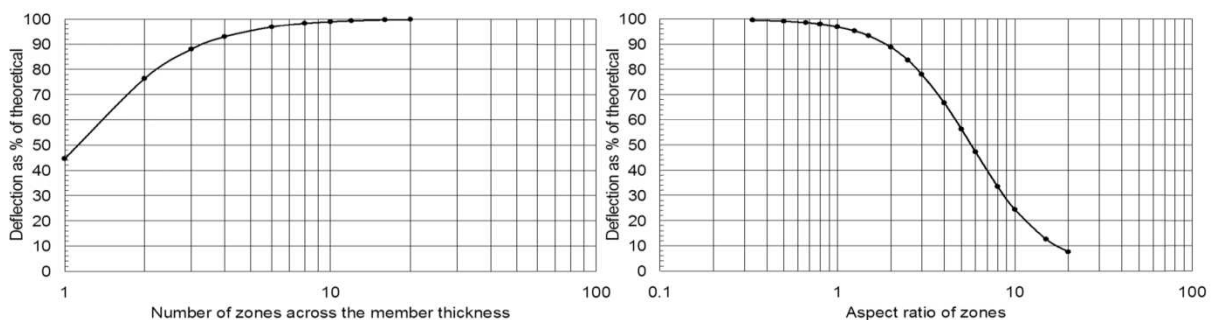


Figura 5.- Influencia del número de elementos en el canto de la losa (relación de aspecto = 1) y de la relación de aspecto (número de elementos = 6). Pound, C. 2006.

Los resultados obtenidos con el cálculo mediante una discretización con elementos volumétricos serían los movimientos y tensiones en la losa. Para obtener los esfuerzos se debe hacer una integración de las tensiones mediante la programación específica de unas subrutinas.

Al igual que en la metodología de mallado con elementos estructurales, se deberá incluir, cuando se emplean elementos volumétricos, unos elementos junta entre el mallado de la losa y el cuerpo de la presa. Aprovechando esta característica, se pueden independizar ambas mallas, pudiéndose emplear una discretización para la losa mucho más uniforme y regular, que consecuentemente asegurará unos resultados más precisos (ver Figura 6).

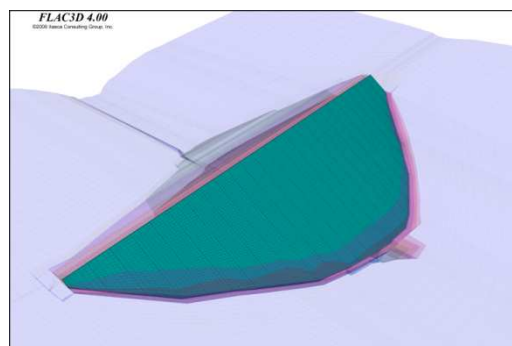


Figura 6.- Ejemplo del mallado regular de la losa de una presa típica

3.6. ELEMENTOS JUNTA ENTRE LOSAS Y LOSA-PLINTO

La construcción de la losa de impermeabilización se realiza mediante carros de hormigonado trepante que van ejecutando los diferentes paños de la misma, de unos 10-15m de anchura, con juntas verticales.

Estas juntas verticales están dotadas de unos elementos de impermeabilización que permiten su apertura pero impiden el flujo de agua, pudiéndose transmitir compresiones entre los labios de las juntas pero no tracciones (Figura 7a).

Adicionalmente, entre la losa y el zócalo (o plinto) se debe ejecutar una junta perimetral para proporcionar un enlace flexible e impermeable de forma que los movimientos de la pantalla sean posibles garantizando su continuidad y sin comprometer su impermeabilidad ((Figura 7b).

En la modelización de la losa es fundamental incorporar estas juntas para reproducir adecuadamente los movimientos y esfuerzos de los distintos paños verticales de losa y entre esta y el plinto.

Empleando una discretización mediante elementos volumétricos se debe incorporar unos elementos interface entre los elementos existentes en los labios de cada junta vertical y comprobar que se permite la existencia de aperturas. A estos elementos junta se les debe dotar de una rigidez normal y tangencial, así como un comportamiento resistente en la rotura tipo Mohr-Coulomb, considerándose habitualmente una cohesión nula y un ángulo de fricción del orden de 30-35-40°.

En el caso de emplear elementos estructurales, la modelización de las juntas verticales es mucho más compleja. El fenómeno de apertura de juntas se puede conseguir mediante duplicación de los nodos estructurales que coinciden sobre la junta. En cambio, para conseguir modelizar la aparición de compresiones en la junta se deberían emplear unos elementos estructurales que, conectando los nodos de ambos elementos, transmitan únicamente las compresiones y no las tracciones.

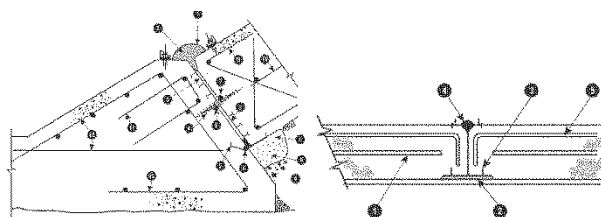


Figura 7.- Detalles típicos de juntas entre paños verticales y entre losa y plinto. ICOLD, 2011

En la Figura 8a se pueden ver las isolíneas de compresiones horizontales que se obtienen en el ejemplo típico ilustrativo utilizado. Se observa como entre los paneles situados en las partes laterales de la losa, no existen compresiones debido a que se producen aperturas de las juntas.

Como complemento, en la Figura 8b, se muestran los movimientos de la pantalla, pudiéndose comprobar que se producen discontinuidades en las isolíneas, aspecto que indica la existencia de movimientos diferenciales entre paños.

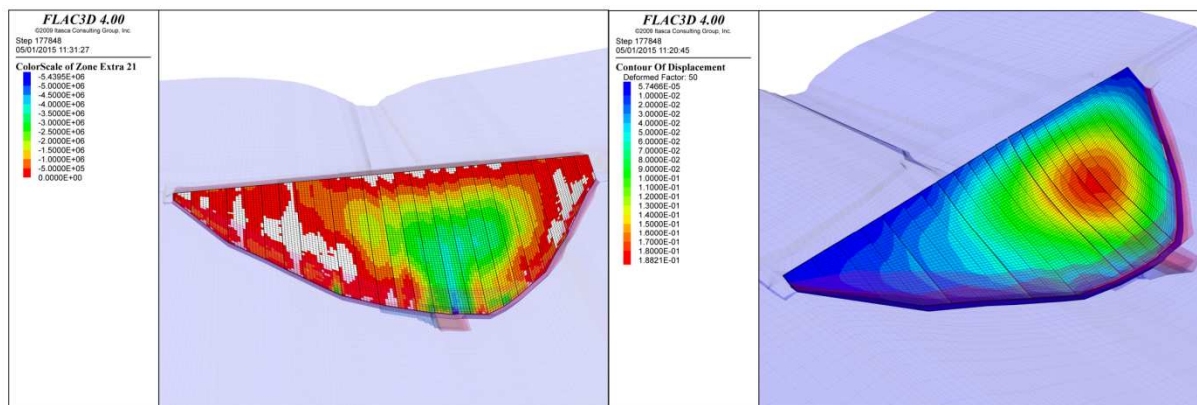


Figura 8.- Isolíneas de compresiones horizontales e isolíneas de movimientos totales en la losa de una presa típica

3.7. MONITORIZACIÓN DE ELEMENTOS DE AUSCULTACIÓN

Cualquier modelo numérico que se realice lleva implícito la necesidad de su calibración con medidas reales para poder validar la bondad del mismo, y por lo tanto de sus resultados, o incorporar las modificaciones necesarias para proceder de nuevo a su cálculo. A tal efecto, es importante disponer en el modelo de puntos, o perfiles, de control donde se vayan capturando los datos a medida que con el cálculo se están simulando las diferentes fases de la construcción.

Así, como ejemplo, se pueden monitorizar los movimientos del cuerpo de la presa, presiones totales y/o intersticiales, en determinados puntos de la misma o del terreno, y muy en particular desplazamientos de la pantalla.

En todos estos casos, es muy conveniente disponer perfiles de control en el cálculo que sean lo más parecidos a los que se vayan a disponer durante la obra, y registrar su evolución. Es muy útil y pedagógico realizar unos videos particularizados para cada elemento de auscultación, de forma que se pueda ver la tendencia y velocidad de producción de los registros.

En la Figura 9a se pueden ver las isolíneas de movimientos horizontales del ejemplo ilustrativo, en una sección transversal del cuerpo de presa en donde, por ejemplo se tenga previsto situar un inclinómetro “sub-vertical” (alojado en el interior de la pantalla), y en la gráfica inferior el registro de movimientos esperables de dicho inclinómetro según los resultados de los cálculos.

Por otro lado, en la Figura 9b se muestran los movimientos que como pronóstico de los cálculos se registrarán en un inclinómetro inclinado situado en la pantalla.

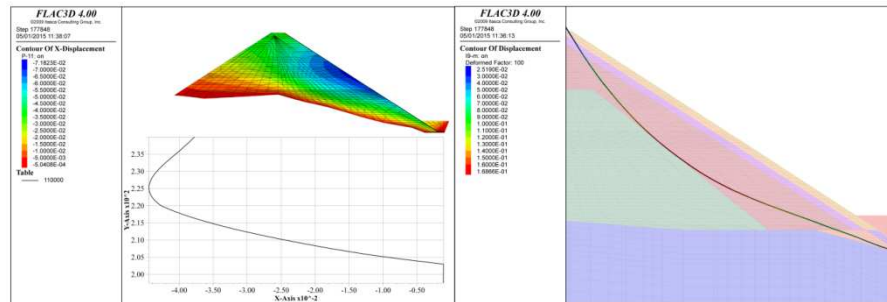


Figura 9.- Ejemplos de diferentes salidas gráficas para la monitorización y control de los elementos de auscultación.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El diseño de presas de escollera con pantalla de hormigón como elemento de impermeabilización, se aborda habitualmente realizándose diversos cálculos bidimensionales en deformación plana del cuerpo de la misma. Sin embargo, esta metodología de cálculo no permite determinar, con la suficiente precisión, el estado tensional de la pantalla de hormigón, por lo que su seguridad estructural tampoco se puede estimar adecuadamente.

Para poder superar dichas limitaciones y carencias en la obtención de las tensiones de la losa, y así posibilitar la verificación de la bondad del diseño, se considera que el modelo numérico debe incluir, al menos, los siguientes aspectos:

- Modelización precisa de la geometría de la cerrada y del cuerpo de la presa, incluyendo la excavación del terreno prevista.
- Reproducción secuencial de las diferentes fases constructivas y de llenado, con un número suficiente de subfases.
- Zonificación del cuerpo de la presa y aplicación a los distintos materiales de un modelo de comportamiento en el que las propiedades deformacionales (y en ocasiones resistentes) estén influenciadas por la presión de confinamiento.
- Discretización adecuada de la losa de hormigón empleando un número suficiente de elementos en el canto, con una relación de aspecto reducida.
- Empleo de elementos junta entre losas y entre la losa y el plinto.
- Monitorización de los elementos de auscultación.

Realizando un modelo con estas características, se puede comprobar, entre otros argumentos, si el canto de la losa y el armado propuesto es adecuado o es necesario aumentar el canto (por compresiones excesivas) o la cuantía de armado en alguna zona de la losa (por tracciones excesivas), ya que como se presenta en la Figura 10 a modo de ejemplo, las distribuciones de tensiones obtenidas presentan distribuciones irregulares.

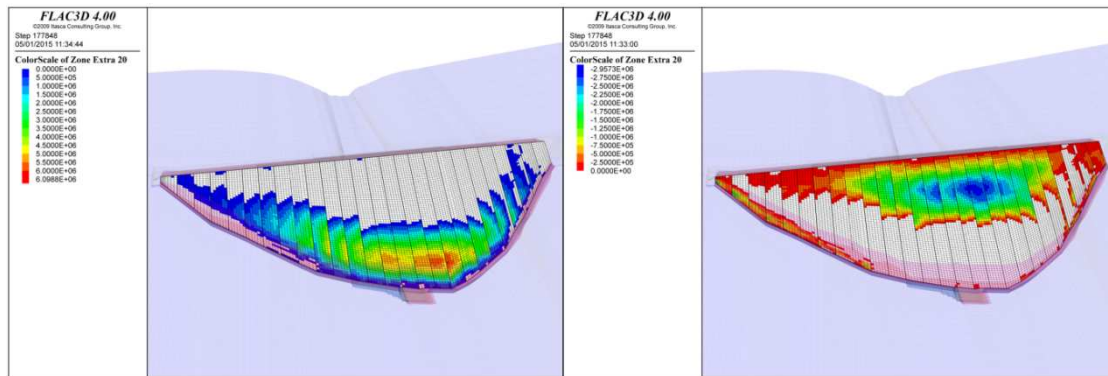


Figura 10.- Distribuciones de tracciones (izquierda) y compresiones (derecha) longitudinales en una presa típica

5. AGRADECIMIENTO

Se quiere agradecer a la Fundación Agustín de Betancourt que merced al convenio suscrito en su momento entre la E. T. S. Ing. de Caminos, Canales y Puertos de la UPM y el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, ha posibilitado la elaboración de este trabajo.

6. REFERENCIAS

Vallarino, E. (1995). Tratado básico de presas. Colección Seínor, número 11. Ed. Paraninfo.

Itasca Consultores. (2011). Estudio de la influencia del espesor de la tonpada en los resultados obtenidos con un modelo hiperbólico. Informe Interno.

Pound, C. (2006). The performance of FLAC zones in bending. Proceeding of the 4th International FLAC Symposium of Numerical Modeling in Geomechanics. Madrid, Spain. 29-31 May 2006.

ICOLD Bulletin 141. (2011). Concrete face Rockfill Dams. Concepts for design and construction.